

懸垂型シェルの斜材配置決定法に関する研究

DETERMINATION METHOD OF BRACING MEMBER ARRANGEMENT OF HANGING TYPE SHELL

建築構造学分野 村口 貴紀

Structural Engineering Takanori MURAGUCHI

線材で構成されたラチスシェルは力の伝達方向が限られるため組み方によって力学性状が変化する。本研究では軸力抵抗型である懸垂曲面を取り扱い、2方向格子シェルに組み込む斜材の配置を決定する方法を提案する。最初に形状を連続体で解析し、主応力に着目した斜材を適切に配置することで、軽量で優れた力学性状のラチスシェルが得られた。提案した手法の適用例を示し、座屈の検討・許容応力度設計をして本手法が実際の構造物に適用可能であることを確認した。

The direction of force transmission is limited in the lattice shell, so the mechanical properties change depending on arrangement. In this study, we deal in a hanging type curved surface which is an axial force resistive type and propose determination method arrangement of bracing members to be inserted in the two-way grid shell. By analyzing the shape with a continuum and arranging bracing member focused on principal stress, light and mechanical efficient lattice shell was obtained. We confirmed the proposed method can be applied to the actual shell structure by showing example and investigating buckling and doing allowable stress design.

1. 序論

連続体シェルの形状作成方法の中に構造解析に頼らない懸垂曲面の手法を拡張したのがあり、熱可塑性樹脂（アクリル樹脂）の高温状態における材料特性の変化を利用したシェルの形状決定法が提案されている⁽¹⁾。さらに熱可塑性樹脂に繊維補強が加えられたCFRTP材を吊下げ、加熱装置で熱を加える実験を行うことで得られる形状は、アクリル樹脂よりも自重時に応力の偏りが小さく、曲げモーメントも小さい軸力抵抗型のシェルになることが分かっている⁽²⁾。

一方で工業化の進展により鉄骨や木材による線状の部材を網目状に配置して曲面を形成するラチスシェルが発展した。ラチスシェルは主に軸力で荷重を伝達し、コンクリートで形成される連続体のシェルよりさらに軽量である。近年、解析技術の進歩によりFEMを用いて複雑な自由曲面形状の構造物の設計が可能となった。しかしこれらは形状最適化という概念の基で設計が行われ、ラチスシェルは形状だけではなく線材の組み方によっても大きく変化する。ラチスシェルは板要素の連続体シェルとは異なり力の伝達方向が限られる。そのため適切な線材の組み方をしなければ力が形状に沿って伝達せず、非合理的な構造になる。

本研究では既論の懸垂曲面⁽¹⁾⁽²⁾を扱い、それを元に

ラチスシェルを作成する。現状では2方向格子ラチスの斜材配置に関する研究はない。そこで離散化した2方向格子ラチスシェルに斜材を組み込んで斜材の配置方法を提案することで、連続体シェルの形態特性のように力を支持部へ合理的に流し、軽量かつ力学性状の優れたラチスシェルを作成することを目的とする。まず懸垂曲面の形状を連続体として自重下の力学性状を把握し、次に懸垂曲面の形状を格子材に斜材を加えたラチスシェルで作成する際、連続体の断面中央の主応力に着目した斜材配置方法を提案する。最後に適用例・座屈耐力の検討をすることで手法の適用性を確認する。

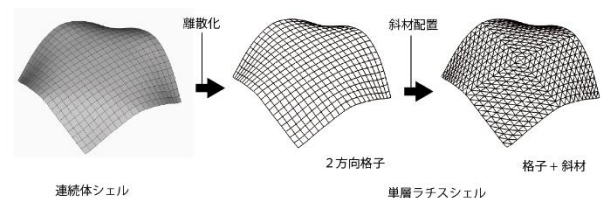


図1 連続体シェルからラチスシェルへの離散化

2. 形状モデルと連続体における応力性状

2.1 形状モデル概要

本論で取り扱う懸垂型シェルをモデル化する。モデルはAcryl板を利用し、実験で作成したモデル（以下A-eモデル）⁽¹⁾CFRTP材を用いて実験で作成したモデル（C-eモデル）⁽²⁾C-eモデルを初期形状として形状最

適化解析を用いたモデル (C-s モデル) (2)とする。懸垂曲面はシェル屋根として中規模程度である 50m×50m の平板から得られた形状とする。

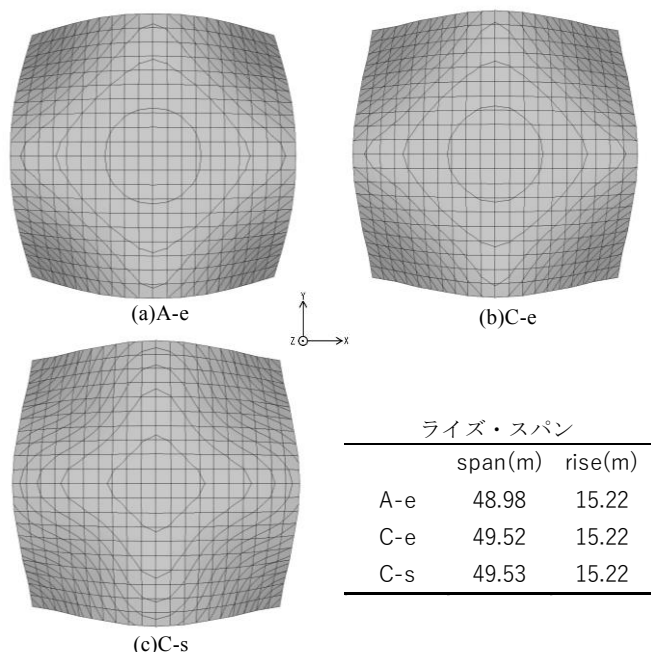


図 2 各モデル形状

	ライズ・スパン	
	span(m)	rise(m)
A-e	48.98	15.22
C-e	49.52	15.22
C-s	49.53	15.22

2.2 自重時における応力性状

モデル形状の連続体における力学性状を確認するために、自重のみの線形静解析を行う。部材はコンクリートを想定して、材料定数はヤング係数 $2.365 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 、単位体積重量 2400kg/m^3 、ポアソン比 0.2 とする。シェル厚は均一とし、0.1m と設定した。

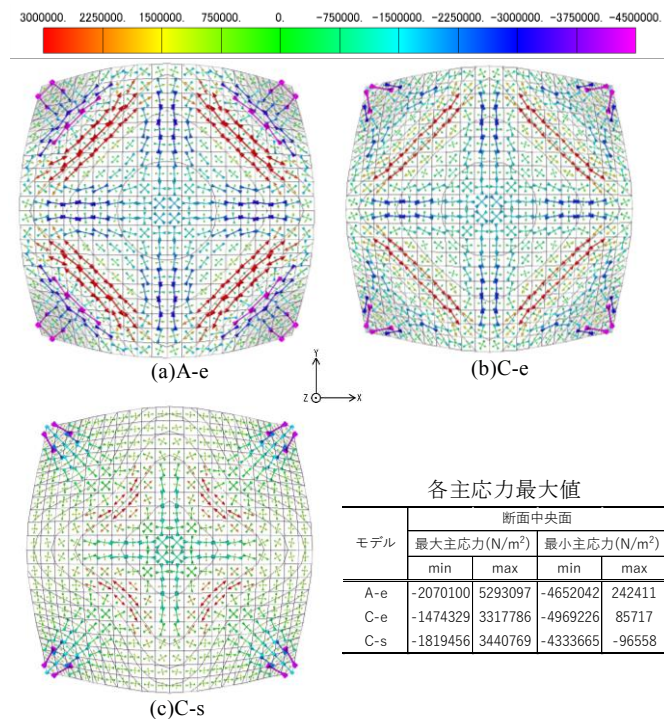


図 3 各モデルの断面中央の主応力図(N/m²)

表 1 各連続体モデルの応力結果

解析モデル	X(Y)軸曲げ (Nm/m)		XY軸ねじれ (Nm/m)	総歪エネルギー (Nm/m)	最大変位 (m)
	正	負			
	A-e	14131			
C-e	8716	-13417	4445	49854	0.098
C-s	4944	-3536	1992	14461	0.053

メッシュ分割は 20×20 、境界条件は四隅 3 点ピン支持とする。

各モデルの応力、断面中央部の主応力図と 1m 毎の等高線図を表 1、図 2、図 3 に示す。実験により作成した A-e モデルと C-e モデルは主応力線図が類似していることが確認できる。特徴としては等高線の間隔が小さくなり始めるところ(曲率が大きいところ)に強い最大主応力(引張力)が働く。A-e モデルは伸び剛性と曲げ剛性を有する材料で製作したものであるため、形状が湾曲している。そのため引張力が働く主応力が支持部へとうまく流れずに支持部近傍に大きな主応力が生じている。一方で C-e モデルは形状が A-e モデルと比較して直線に近く、主応力が支持部へと流れ、支持部に主応力は大きく生じるが全体的には主応力の偏りが小さいことが分かる。方向に関しては等高線に対応し、平行な方向に最大主応力、垂直な方向に最小主応力が発生していることが分かる。また曲げモーメント・総歪エネルギー・最大変形をみても A-e モデルよりも小さく力学性状が優れていることが確認できる。C-s モデルは形状最適化モデルであるため、力学性状が C-e モデルよりさらに優れている。形状については支持部付近から中央にかけて形状がくぼみ、谷状に変化している。そのため支持部に主応力が大きく流れ、全体の引張力、圧縮力は小さくなり C-e モデルと比較して小さい範囲での応力の流れとなっている。以上 3 つのモデルから 4 隅支持部に力の流れを誘導することにより、主応力の偏り、曲げモーメント・総歪エネルギー・最大変形が抑えられることが確認できる。

3. 全ての斜材を配置した場合の応力性状の比較

2 章で得られた熱可塑性樹脂の懸垂型シェルの形状を元に離散化した単層ラチスシェルを作成して解析を行い、斜材配置パターンによる応力性状を比較した。

3.1 解析モデル

形状モデルとして、C-e モデルを一例とする。配置パターンとしては格子材だけで形成されたモデル C-e-sq に全ての格子材に斜材を配置した方向が異なる 3 つのモデルを加えた計 4 種のモデルを作成した。モデル概要図、配置パターンを図 4、図 5 に示す。図 5 は対称性を考慮し、図 4(c)の赤点線部分を拡大して表している。(以後 1 部の解析結果は拡大箇所を示す)使用部材は全て同じ部材とした。部材諸元(3)を表 2 に示す。荷重条件は固定荷重とし、鋼材重量に加え仕上げ材を 0.5kN/m^2 と仮定した。境界条件は図 4(c)で示すように 4 隅を 3 点ピン支持、部材の接合は剛接合としている。

表 2 部材諸元(3)

部材	円形鋼管	ヤング係数 E(N/mm ²)	205000
外径 D(mm)	190.7	せん断弾性係数 G(N/mm ²)	79000
管厚 t(mm)	7	降伏応力度 σ_{max} (N/mm ²)	235
断面積 A(mm ²)	4040	ポアソン比	0.3
断面二次モーメント I(cm ⁴)	1710	単位体積重量 ρ (kg/m ³)	7850

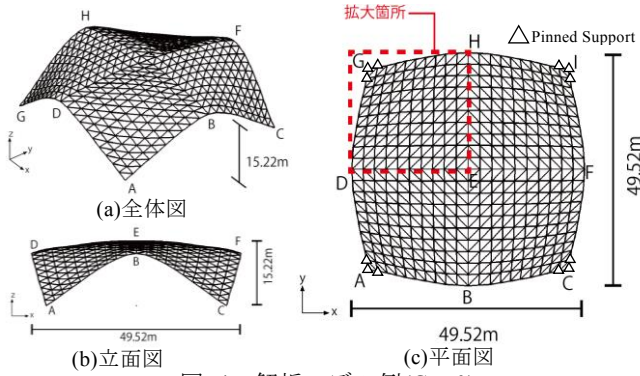


図 4 解析モデル例(C-e-0)

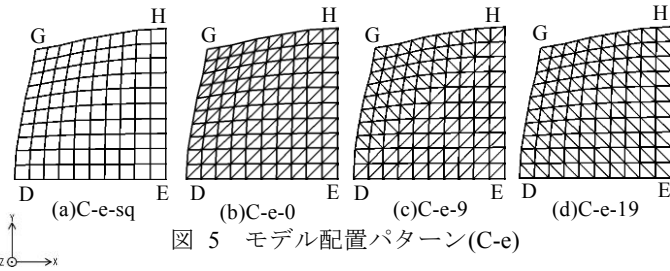


図 5 モデル配置パターン(C-e)

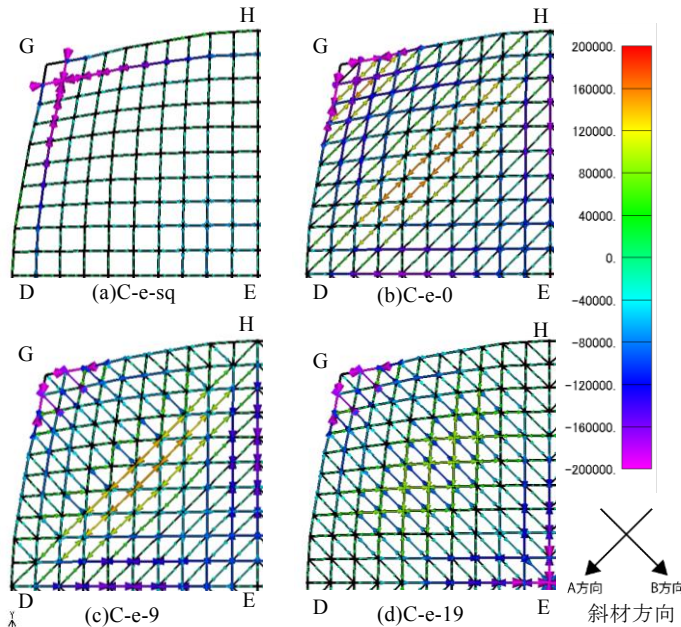


図 6 各配置パターンの軸力図(N)

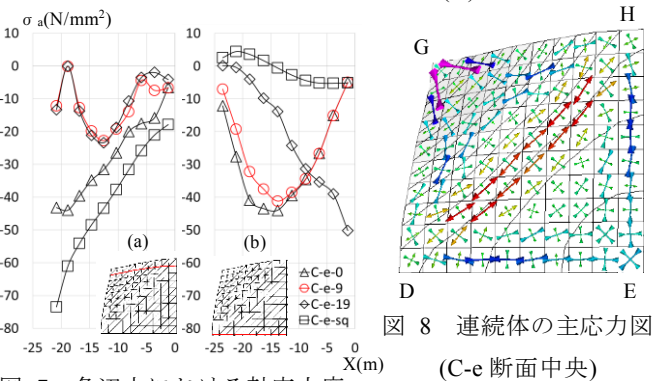


図 7 各边上における軸応力度

3.2 考察

格子材だけで作成した C-e-sq モデルでは軸力伝達が直角格子上の 2 方向だけとなり、支持部付近に集中する。応力の特徴は連続体の性状と大きく異なる。

斜材を配置して軸力が伝達する方向を増やすこと

で軸力の偏りは大きく減少し、大小の傾向が連続体のモデルと類似した。

C-e-0 モデルでは 4 隅支持部へ軸力を伝える方向とは逆に斜材が配置されているため支持部付近に圧縮が集中した。このモデルは図 7(a)の箇所を通る部材群の支持部近傍の軸応力度に着目しても他の斜材を配置したモデルより圧縮応力度が卓越していることが分かる。

C-e-9 モデルでは曲率が大きいところに対応して斜材に発生する引張力から伝達される軸力を、支持部付近の斜材を B 方向に変えることにより、支持部に向かって軸力が流れる。そのため図 6 の軸力図をみると C-e-0 モデルより支持部付近の圧縮力が緩和されていることが窺える。図 7 を見ても軸応力度が小さく、軸力伝達が上手く行われていることが確認できる。

C-e-19 モデルでは引張が斜材ではなく格子材に伝達し、C-e-9 モデルと比較してもほぼ変わらず、良い性能となっている。しかし図 6 の軸力図から中心部 E に大きな圧縮力がかかり、図 7(b)をみても大きな圧縮応力度が生じていることが確認できる。

図 8 に示した連続体のモデルの断面中央の主応力図とラチスシェルの軸力を比較すると、引張方向と圧縮方向のベクトルが C-e-9 の軸力図と類似していることが分かる。以上の考察から連続体の断面中央の主応力に類似した斜材配置をすることで優れた力学性状を示す結果となった。しかし比較対象が一定の方向のみを比較したものであり、またすべての格子材に斜材を配置したため、応力が伝わらない斜材も見られた。

4. 連続体の主応力に着目した斜材配置決定法

本章は厳密に主応力に着目した斜材配置方法の提案をし、軽量で力学性状の優れた斜材配置を探索する。

4.1 主応力の大きさと対応させた斜材配置

はじめに懸垂曲面は軸力型のシェルであることから、連続体の最大主応力・最小主応力の平均値を算出し、主応力の大きさの大きい箇所のみの格子材に斜材を配置する方法を検討する。パラメータは各メッシュの最小主応力とする。配置方法は連続体の最小主応力の平均値の 110~130%、130~150%、150%以上といった大きさによってメッシュを区別し、各モデルは一定以上の最小主応力の大きさの箇所に斜材を配置する。また今回検討するモデルは C-e モデルとし、2 章より、曲率の大きい場所に強い引張が働く特徴があるため、全てのモデルに最大主応力平均値の 400%以上の箇所に配置した。主応力図と対応させた斜材配置の配置パターンモデルを図 10、図 11 に示す。

4.2 応力全体の力の流れと対応させた斜材配置

本節では斜材配置において 4 章 1 節で主応力の大きさについて検討したモデルを修正し、支持部へと合理的に軸力を流す配置を提案する。

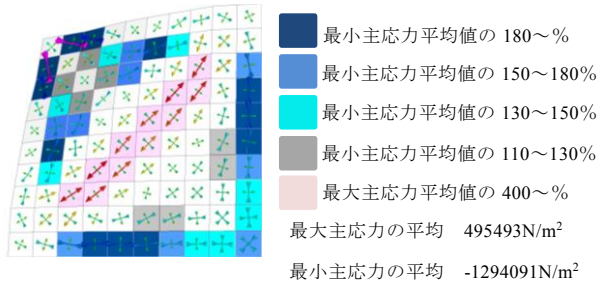


図 10 連続体のメッシュ毎の主応力と偏差値

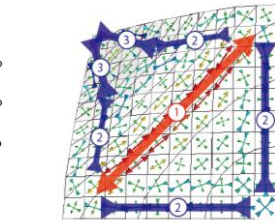


図 9 力の流れの概略図(C-e)

表 3 全斜材配置を

基準とした斜材・重量比

	斜材比	重量比
C-e-9	1.00	1.00
C-e-c110	0.51	0.80
C-e-c130	0.40	0.76
C-e-c150	0.29	0.71
C-e-cv110	0.36	0.74

表 4 各配置パターンの応力結果

		C-e-9	C-e-c110	C-e-c130	C-e-c150	C-e-cv110
最大軸力 (N)	引張	148159	218177	240015	262493	176128
	圧縮	-200076	-208532	-218359	-257305	-187719
最大曲げ (Nm)	正	14704	21234	21858	19698	13523
	負	-9432	-10378	-10730	-15881	-9732
総歪エネルギー (Nm)		16921	24513	26740	29242	16238
最大変形 (m)		0.088	0.138	0.158	0.150	0.0937
座屈荷重/固定荷重		5.68	4.16	3.89	3.74	3.79

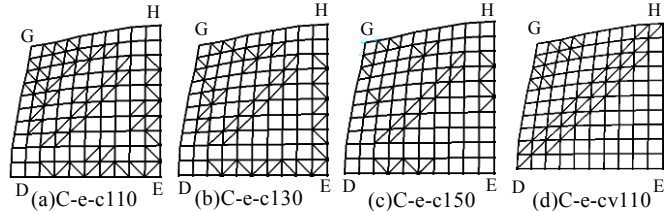


図 11 検討する配置パターン

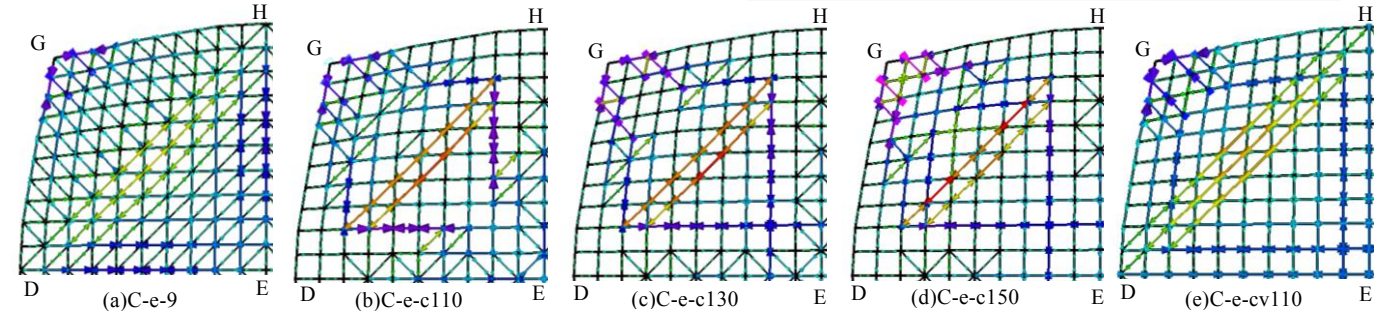
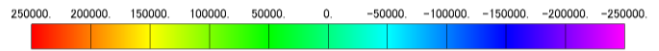
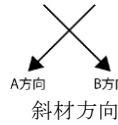


図 12 各配置パターンの軸力図(N)

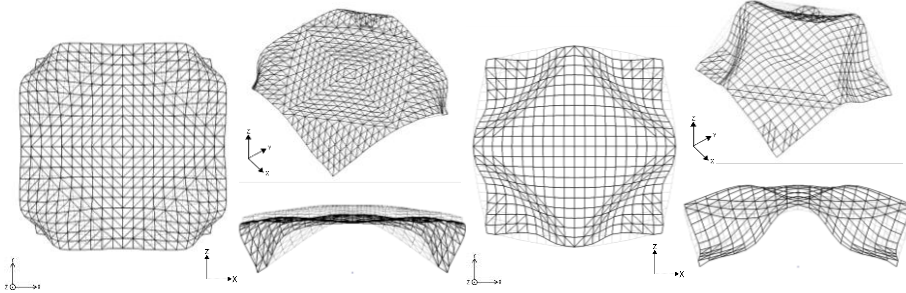


図 13 各モデルの線形座屈モード(1次 変形 3倍)

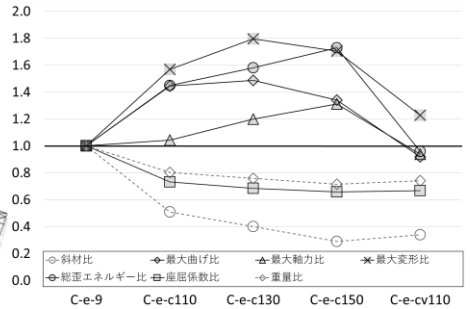


図 14 全斜材配置を基準とした無次元化の比較

同じ解析条件で 4 章 1 節のモデルと 3 章のモデルと比較する。

全体の流れに関しては図 9 から等高線の間隔が大きくなり始めるところに強い最大主応力①が発生し、その引張力は圧縮力②③で支持部へと伝えられている。

配置として前述で示した C-e-c110 モデルを使用し、そこから図 9 に示した力の流れの概略図になるように次の検討をした。モデル C-e-cv110 を図 11 で 4 章 1 節のモデルと共に示す。

- ・①の力が伝わるように最大主応力に着目した斜材配置の範囲を拡大しテンションリングを作成。
- ・②の力は格子材で伝えるために、付近の斜材を除く。

4.3 応力性状・座屈性状

はじめに、3 章と同じ部材諸元・境界条件で、線形静解析を行った。主応力の大きさと対応させたモデルについて、図 12 の軸力図から中央部(D-E-H)の斜材は格子材と比較的平行な向きの主応力のベクトルから斜

配置したものであり、応力の伝達が上手く行われず、テンション材として最大主応力の大きい箇所に配置した斜材から伝わる格子材に圧縮力が集中した。軸力に伴い曲げ・変形・総歪エネルギーは上昇する。境界支持部付近と引張斜材の間も、同様の理由で応力が局部的に集中する。また偏差値を上げて斜材を減らすと引張材の軸力が上昇していくためこの斜材は応力伝達に重要な役割を果たしていることが分かる。C-e-cv110 は修正前(C-e-c110)と比較して軸力が全体に伝わり、局所的な集中が抑えられている。また修正後のモデルは連続体の断面中央の主応力と類似している。図 14 から曲げ・変形・総歪エネルギーも斜材・重量を減らしながら抑えられることができ、力学性能が向上した。また全部部分を斜材で配置した C-e-9 のモデルと比較しても C-e-cv110 のモデルは斜材の数が 36%、重量 74%ながら軸力・曲げ・総歪エネルギーの力学性能を維持することができている。

次に3章と同じ部材諸元・境界条件でNx-NASTRANで線形座屈解析を行った。図13よりC-e-9に関しては支持部付近にせん断変形の座屈モードが生じる。一方でC-e-cv110は支持部付近の斜材、中央付近の斜材がなくなるため、面内剛性・面外剛性が共に低下し、支持部付近と中央部が大きく変形する座屈モードとなる。座屈荷重係数が修正前よりも低下し、全斜材配置したC-e-9より6割ほどになるため、座屈の検討が課題となる。

5. Tachira club を例とした適用性検討

本章ではTachira clubを例にとり4章で設定した斜材決定法を行いその一例とすることを目的とする。

Eduardo Torrejaの設計のTachira Clubは懸垂曲線を曲線形状の母線方向に推動させて作成され、支持点に高さ不整があることが特徴である。Tachira Club計画案⁽⁴⁾を参考に作成した形状モデルを設計曲面とする。

5.1 連続体の応力性状

設計曲面の連続体にける力学性状を確認する。解析モデルを図15(b)に示す。解析条件は、自重のみの線形静解析として、ヤング係数 $2.365 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 、ポアソン比0.2、質量密度は 2400kg/m^3 とする。シェル厚は0.1mとし、境界条件は図15(a)の通りとする。解析結果として、図16より全体的に応力が小さく力学性状に優れた曲面であることが確認できるが、支持点の高さ不整のある部分に局所的な応力が集中する。

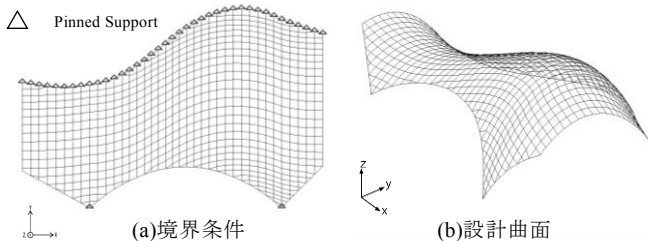


図15 設計曲面と境界条件

表5 各配置パターンの応力結果

ライズ・スパン		T-all	T-c140	T-cv140	T-sq	
spanX(m)	59.7	最大軸力 (N)	引張 43808	70389	42040	22693
		圧縮 -313531	-198983	-197536	-210155	
spanY(m)	41.7	最大曲げ (Nm)	正 3089	3554	3603	5235
		負 -10184	-4988	-5044	-6576	
riseZ+(m)	14.3	総歪エネルギー(Nm)	1554	1343	1224	1569
riseZ-(m)	6.5	最大変形(m)	0.0372	0.0526	0.0492	0.0568
		座屈荷重/重量	5.45	6.26	6.59	4.63

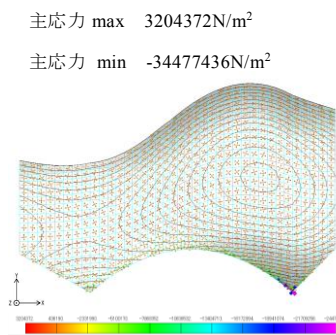


図16 断面中央の主応力図 (N/m²)

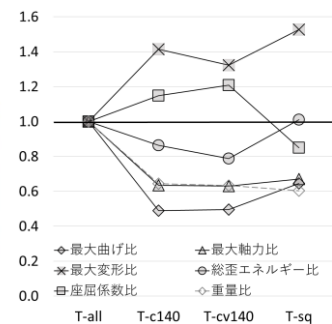


図17 全斜材配置を基準とした無次元化の比較

5.2 斜材配置

離散化の方法は図15の連続体モデルのメッシュ境界線に鋼管を配置して2方向格子の単層ラチスシェルを作成した。そこに主応力の大きさと対応させて斜材を配置させた。Tachira clubの主応力は主に圧縮力が働き、引張力がほとんど表れなかったため主応力をすべて絶対値で加算してから平均値を算出した。それぞれのモデルに対し、自重のみの線形静解析・線形座屈解析をして各モデルの応力、座屈荷重を比較した。部材諸元は3章の表2と同様である。境界条件は図15(a)の通りであり、部材の接合は剛接合としている。

全ての斜材を配置した(T-all)場合、軸力が非常に小さい斜材が多く大きい重量に対して歪エネルギー・軸力・曲げの力学性能において最大値が大きくなっている。平均値の大きいところだけ配置するT-c140モデルは、主に前面アーチ部分に斜材が配置されており全斜材と比較して重量が7割弱になる一方で座屈/重量をはじめ、他の力学性能も優れている値となっている。このため図からアーチ付近に斜材を配置することの重要さが確認できる。主応力の大きさから修正し全体の力の流れに対応させ、軸力を支持部へ伝えさせたT-cv140はT-c140モデルよりさらに重量を減らしながらさらに座屈荷重/重量が上昇し、他の力学性能も優れた形状を得ることができ、提案した斜材配置決定法の有用性の確認ができた。

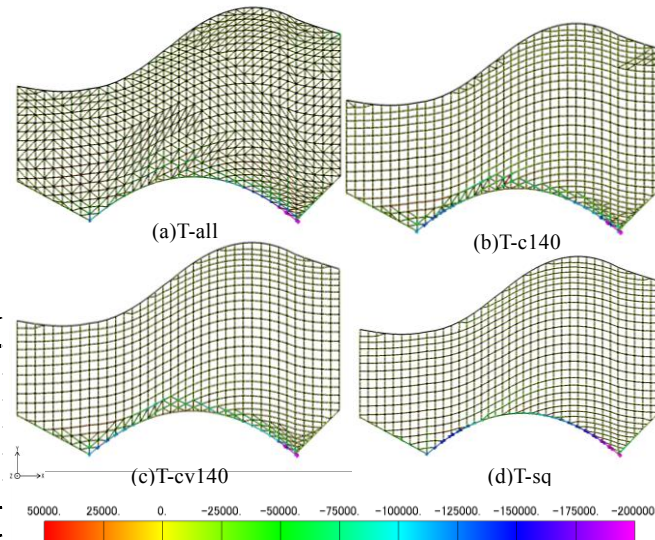


図18 各配置パターンの軸力図(N)

6. 実施設計の検討

実際のシェル構造の設計へ適用可能性を検討するために、幾何学的非線形を考慮した非線形静解析で座屈荷重を算出し、短期雪荷重に対する許容応力度設計⁽⁵⁾より安全率を算出した。荷重は固定荷重(鋼材重量+仕上げ材 0.5kN/m^2) + 積載荷重(0.6kN/m^2) 積雪荷重(0.77kN/m^2)とする。

6.1 モデル概要

①3章の全斜材配置(C-e-9)モデル・②4章で提案した(C-e-cv110)モデル・③補剛パーツモデル⁽⁶⁾・④部材径増大モデルの4つのモデルとする。

4章で作成した②モデルは、軽量でありながら応力性状が良い性能となった。しかし座屈荷重が低下した。そのため軸力の流れを維持したまま座屈耐力を上昇させるために、③・④を作成した。③は格子グリッドに8本の張力材と1本のポスト材で形成された張力トラス⁽⁶⁾で補剛したモデル。④は前部材の鋼管の径を管厚は同じのまま増大させたモデルである。

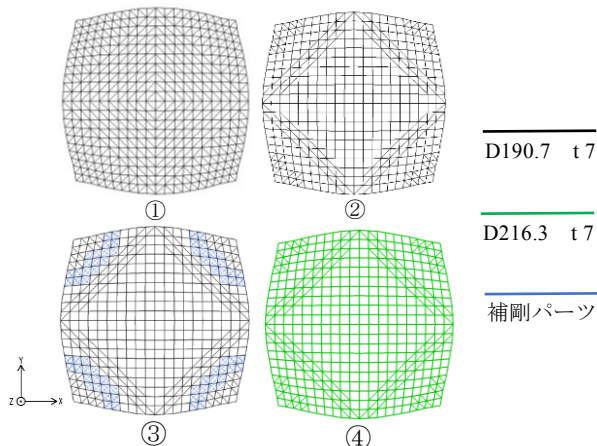
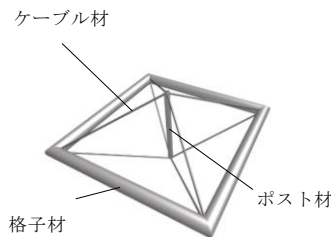


図 19 モデル概要

(a)部材諸元(鋼材)⁽³⁾

部材種	格子材	ポスト材
部材	円形鋼管SS400	
外径 D(mm)	190.7	89.1
管厚 t(mm)	7	2.8
断面積 A(mm ²)	4040	760
断面二次モーメント I(cm ⁴)	1710	70.7
ヤング係数 E(N/mm ²)	205000	
単位長さ重量 (kg/m)	31.7	5.96
部材長(m)	2.5	1.4



(c)張力トラス

(b)部材諸元(ケーブル材)⁽⁷⁾

部材種	ケーブル材
部材	構造用ストランドロープ(7×7)
ロープ径(mm)	28
断面積 A(mm ²)	382
ヤング係数 E(N/mm ²)	140000
単位長さ重量 (kg/m)	3.16
部材長 (m)	1.90

図 20 補剛パーツ概要⁽⁶⁾

6.2 考察

③については図 21 から重量は全斜材を配置させたモデルの約 77%であるが、短期等分布荷重の安全率は 1.58、等分布の座屈荷重/重量の値も 95.6 と全斜材を配置したモデルより低い値となった。

④については座屈荷重が大きく上昇し、重量は全斜材の約 85%と補剛パーツモデルより大きい。座屈荷重/重量は全斜材配置モデルより良い性能であり、安全率も断面積が大きいため 1.83 と大きな値となっている。応力性状・総歪エネルギーも全斜材配置と同じくらい性能がよく、かつパーツの接合もなく余分な部材が増えないため、このモデルはデザイン、施工性の観点からも優れているといえる。以上から検討した C-e

モデルに関しては部材径を増大させたモデルが実施設計においても安全なモデルである。

表 6 各応力・座屈性状

		①	②	③	④
短期荷重(N)		5768324	5482587	5523905	5595135
非線形座屈荷重(N)		10970000	7091440	8190000	9920000
/短期荷重比		1.90	1.29	1.48	1.69
最大軸力(N)	引張	464886	614807	548679	550802
	圧縮	-476986	-585654	-498650	-516729
最大曲げ(Nm)	正	44729	68686	50196	41553
	負	-29086	-48709	-37494	-29223
総歪エネルギー(Nm)		104678	131196	116838	106996
最大変形(m)		0.297	0.452	0.356	0.285

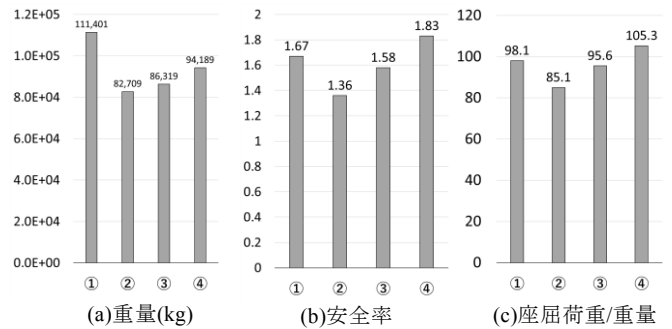


図 21 各モデルの重量・安全率・座屈係数

7. 結論

懸垂型ラチスシェルにおいて以下に示す設計フローで斜材配置を決定することで、軽量で力学性状の優れたラチスシェルが得られた。

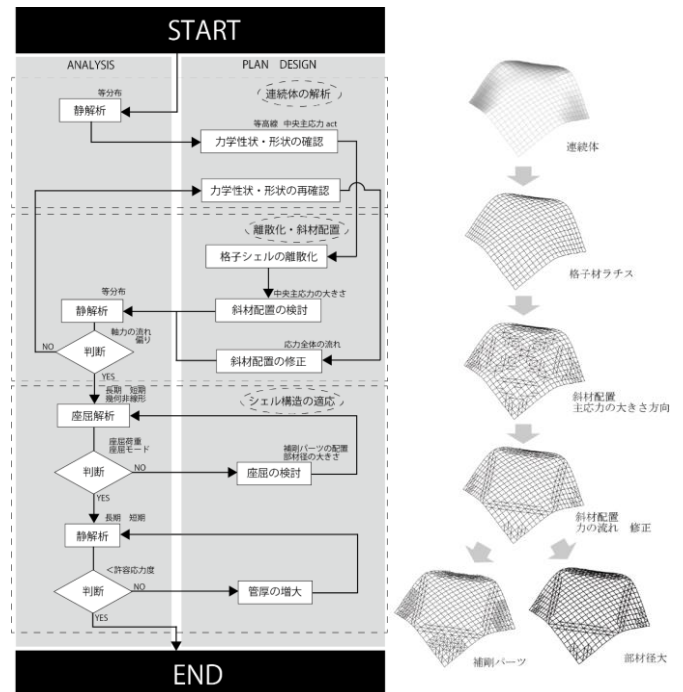


図 22 斜材配置決定法フロー

参考文献

- (1) 渡邊祥「熱可塑性樹脂を用いた自由曲面シェルの実験的形狀決定法に関する研究」大阪市立大学修士論文, 2012
- (2) 高天健臣「吊り下げ実験と最適化解析を組み合わせたシェル曲面形状決定方法の提案」大阪市立大学修士論文, 2017
- (3) 日本建築学会「鋼構造設計規準-許容応力度設計法-」, 2005
- (4) Felix Escrig, Jose Sanchez Profesores de la ETSA de Sevilla「LA BOVEDA DE HORMIGON DEL CLUB TACHIRA EN CARACAS
- (5) 日本建築学会「ラチスシェル屋根構造設計指針」, 2016
- (6) 金山敬, 半谷裕彦「パーツ方式によるハイブリッド単層ラチスシェルのパーツ方法の提案」日本建築学会構造系論文集, pp79-86, 1999
- (7) 日本建築学会「ケーブル構造設計指針・同解説」, 1994